干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.05.01

编者按：

新疆是欧亚大陆最干旱的地区，水资源是实现区域可持续发展的重要条件，而可持续发展的最大制约因素是水资源总量不足和地区分布不平衡。有道是"治边疆者，宜先治水"。针对水资源过度开发利用中存在的诸多问题，中国工程院邓铭江院士研究总结多年的治水理论和工程实践，提出了构建"三层级多目标水循环调控理论与工程技术体系"的总体方案，即从宏观—区域调配、中观—流域调控、微观—绿洲水资源高效利用三个层级，遵循"节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力"的新时期治水方针，对新疆可持续发展面临的水问题和水需求实施全面系统的综合治理，构成了水资源—水问题—水战略的主体框架和顶层设计。编者认为，水是新疆可持续发展的命脉，当前正在实施的乡村振兴战略、美丽乡村建设、生态移民、扶贫搬迁、兵团南进等社会工程，都还需要大量的水土资源增量作支撑，将会进一步加剧水资源供需矛盾，在对水资源承载能力、社会经济发展布局、产业结构优化的过程中，如何做到适水发展，需要进行充分的科学研究和可行性评估。因此，本期刊出此文，对实现新疆水资源可持续发展及优化配置有深远的意义，同时亦以期引发国内外学者的关注与探讨。

三层级多目标水循环调控理论与工程技术体系①

邓铭江[1,2]

（1　新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局，新疆　乌鲁木齐　830000；
2　西北旱区生态水利国家重点实验室，陕西　西安　710048）

摘　要：以新疆典型干旱区内陆河流域为研究对象，通过对地理、地貌、水文气象条件、流域水循环特征的系统分析，提出了水资源开发利用存在的三大问题，即：水资源匮乏且时空分布严重失衡，跨界河流水安全问题突出；水资源过度开发利用，人工绿洲与天然绿洲结构严重失调，生态环境恶化；水资源利用效率效益低，供需矛盾和水盐平衡失控。以水问题和水需求为导向，工程措施与生态保护并举，采用系统科学的基础理论与分析方法，构建了三层级多目标水循环调控理论与工程技术体系，分别从宏观、中观、微观三个层级，提出了区域、流域、灌区水循环调控与水资源高效利用的科学模式和关键技术。结合区域地形地貌特点和水资源禀赋条件，建立了北疆"网式"、南疆"环式"、东疆"串式"结构水循环调控框架，增强区域水资源合理配置的调控能力。针对流域水循环特点，提出山区水库替代平原水库和河道内与河道外引水"三七调控"、经济与生态耗水"五五分账"的综合调控模式。围绕现代灌区建设和面临的挑战，研究指出建立节水灌溉—水盐调控—地下水利用—生态保护"四位一体"的水资源高效利用综合调控技术体系，是干旱区绿洲农业可持续发展的方向。

关 键 词： 干旱区；水资源；水循环；调控理论；三层级多目标

①　**收稿日期：**2019－05－24；　**修订日期：**2019－07－21
基金项目：国家自然科学基金（51609260）
作者简介：邓铭江（1960－），男，博士，中国工程院院士，现任新疆科学技术协会副主席，教授级高级工程师，主要从事干旱区水资源研究与水利工程建设管理工作．E-mail：xjdmj@163.com

水是维系干旱区生态安全与经济社会和谐发展的决定性因素,但受全球变化和人类水土资源开发活动的影响,干旱区内陆河流域水循环过程和生态格局发生了根本性变化,特别是社会经济用水快速增长,大量挤占生态用水已成为实现水资源—生态环境可持续发展的主要障碍[1]。水资源及水循环演变过程与人类活动密切相关,高强度人类活动从多个方面影响和改变自然驱动力下的水循环动力、过程、结构和模式:在循环动力上,从以地形主导的势能为主,增加了人工机械能;循环结构上,在“大气—坡面—地下—河道”自然循环基础上,增加了“取水—输水—用水—排水”的社会侧支循环;循环模式上,在由自然水循环的以产汇流过程/水量汇集为主的基础上,增加了以耗散过程为显著特征的社会水循环模式—从自然水循环过程中取水后逐步分散供给各类用户[2]。可见,水资源与水循环演变过程及人类活动密切相关。天然水循环下的水,仅有自然属性和生态属性,人类社会对水的需求,才使得水成为一种资源和商品,水资源因其对经济社会的服务功能而具有了资源价值,使得水资源在原有的自然属性、生态属性基础上,呈现出社会属性和经济属性,从而形成了水资源的多维属性,相应地也就逐步形成了针对水资源的多维/多目标调控[3]。

调控是调节与控制的合称,其本质就是理性控制人类自身活动,使水资源开发利用程度与自然生态系统处于合理和允许的阈值区间,保持并抵近一种良好的临界状态。国际上,普遍将一个流域的地表水开发利用率不超过40%,作为衡量人类与自然和谐关系的警戒线;在国内,王西琴等研究认为:松花江、辽河、海河、黄河、淮河、长江、珠江等七大河流,从水量与水质相结合的角度综合考量,其水资源开发利用率阈值界于31%～45%之间[4]。钱正英等研究认为:干旱内陆河流水资源最高开发利用率应不超过70%,而生态环境和社会经济系统耗水以各占50%为宜(社会经济平均耗水率按用水量的70%折算)[5]。邓铭江等在系统研究新疆主要河流的水资源利用现状的基础上,进一步将干旱内陆河水循环通量调控模式总结为“五五分账,三七调控”,并认为该模式是维护水资源—生态环境—社会经济系统协调发展的充分必要条件[6]。除本世纪初提出的“‘自然—人工’二元水循环”理论外[7],目前国内类似水循环调控理论方法与关键技术的研究,一般都包涵在水资源配置、结构调整、水利发展、生态保护等科学研究与规划实践中,迄今仍缺少系统的水循环调控理论方法和综合技术措施的研究探索。

干旱区在世界上分布广泛且集中了大部分贫困人口,水资源和生态环境问题十分严峻,是全球环境变化与可持续发展研究中的重点区域之一[8]。对水资源紧缺、生态脆弱的西北地区而言,由于其区内高原、山脉、荒漠/沙漠广泛分布的特殊地貌,使得世界上还没有哪个地区的水循环特征与我国西北干旱区比较类似,如水资源形成区与消耗利用区相互分离(水资源形成在高山地区,而消耗在平原、绿洲和荒漠地区)、地表水与地下水相互转换十分频繁、水资源受全球变暖影响比较敏感、水资源以冰川—积雪—地下水—湖泊及地表径流等多种形式共存,这种特殊性使得没有哪个地方的水资源开发能为西北干旱区提供比较成熟的理论方法和经验模式[9]。因此,研究高强度人类活动影响下的水循环调控,对于干旱缺水的西北地区,具有特殊的重要意义。

新疆除额尔齐斯河外,五百余条河流均为内陆河流,其水循环存在相对封闭、空间分布严重不均、水循环伴生的生态效应敏感、社会水循环效率长期偏低等显著特征,使得其调控需要从宏观、中观、微观三个层级综合考虑,针对现阶段存在的主要水问题,基于系统科学理论与技术,以水问题和水需求为导向,工程建设与生态保护并举,建立符合干旱区域情、水情的三层级多目标水循环调控理论与工程技术体系,支撑经济与生态协调可持续发展,为干旱区水循环调控实践提供理论与决策参考。

1 水循环特征及面临的问题

1.1 自然水循环基础信息

1.1.1 地理、地貌、气象水文

(1) 地形地貌。新疆土地面积 166×10^4 km^2,山丘区占42.7%,平原区占57.3%,平原区中沙漠和荒漠区占70%。昆仑山、天山、阿尔泰山横贯全域,形成“三山夹两盆”的地貌特征。天山横亘中部,将新疆分为南北两部分,南疆塔里木盆地面积为 53×10^4 km^2,北疆准噶尔盆地为 38×10^4 km^2。

(2) 地理环境。新疆处于欧亚大陆中心,在远离海洋和高山环抱的地理因素影响下,形成典型干旱气候,生态环境以荒漠为主体,有水就有绿洲,无

水皆为荒漠。盆地的封闭特性使所有河流成为内陆河(除额尔齐斯河外)，低洼部位成为内陆湖泊或积盐中心。极端干旱的环境造成生态环境脆弱，植被稀疏以致完全裸露，戈壁、沙漠和盐漠广布，沙尘暴和浮尘天气频发。

(3) 气象水文。大气水由三条路径进入新疆上空，一条是西方路径，由纬向西风环流带来的大西洋气流，是新疆的主要水汽来源。其次是西北路径，来自北冰洋的干冷气流，经乌拉尔山和阿尔泰山进入北疆。另一条是西南路径，来自南印度洋暖湿季风，翻越昆仑山和青藏高原进入南疆。据气象部门测算，水汽输入量 11 540 $\times 10^8$ m^3，在本区形成的平均年降水总量 2 544 $\times 10^8$ m^3，折合降水深 153 mm，为全国的 23%。降水量山地为 400 ~ 1 200 mm，盆地边缘 30 ~ 200 mm，盆地中心约 10 ~ 100 mm。平原区降水稀少，蒸发强烈，蒸发能力平原区一般为 1 600 ~ 2 200 mm。

1.1.2 河流及水资源

(1) 径流形成。山区是径流形成区，高大山体拦截高空水汽，产生 2 062 $\times 10^8$ m^3 降水量，占总降水量 81%，形成 2.25 $\times 10^4$ km^2 冰川、570 条河流和大小湖泊 100 多个。山区降水经过产汇流、蒸散发、湖泊调蓄等循环转化，产生 856 $\times 10^8$ m^3 径流量，占河川径流总量 98%。平原是径流散失区，大部份河流出山口后，被引入灌区或消耗于渗漏和蒸发，只有水量较丰的河流才能流入盆地潴水成湖。

(2) 主要河流。由于独特地貌特征，发源于高山地区的内陆河流呈“向心水系”向盆地汇集，在 570 条河流中，北疆 387 条，南疆 183 条。大部分是流程短、水量小的河流，年径流量在 1 $\times 10^8$ m^3 以下的河流就有 487 条，占河流总条数的 85.3%，径流量 82.9 $\times 10^8$ m^3，占年总径流量的 9.4%；年径流量大于 10 $\times 10^8$ m^3 以上的河流共 18 条，径流量 525.7 $\times 10^8$ m^3，占总径流量的 56%。

(3) 水资源量。地表水资源为山区(765.7 $\times 10^8$ m^3)与平原(23.0 $\times 10^8$ m^3)降水产流之和 788.7 $\times 10^8$ m^3。不重复的地下水资源为山前侧渗(32 $\times 10^8$ m^3)与平原降水入渗(14.2 $\times 10^8$ m^3)补给之和 46.2 $\times 10^8$ m^3。因此，新疆多年平均水资源总量为 834.9 $\times 10^8$ m^3(图 1 和表 1)，河川总径流量 879 $\times 10^8$ m^3(含国外入境水量)。实际利用中，扣除 1/4 的出境水量和 1/4 的天然生态用水，可用于社会经济发展的地表水仅为河川总径流量的一半。

1.2 水循环特征及面临的主要问题

1.2.1 基本特征

(1) 水文机理垂直分带性特征。从高山、中山到山前平原，再到戈壁、沙漠，干旱区降水、蒸发、径流等水文要素垂直地带性分布规律明显，即随着海拔高程降低，降水量依次减少，蒸发能力依次增大。高山区为湿润带，干旱指数小于 2；中山区为半湿润带，干旱指数 2 ~ 5；低山及山间盆地是半干旱带，干旱指数 5 ~ 10；山前平原是干旱地带，干旱指数 8 ~ 20；戈壁、沙漠为极端干旱区。

(2) 河川径流补给多样化特征。干旱区河川径流有冰川和永久性积雪融水、季节性积雪融水、降雨、地下水补给及各种组合的混合式补给。中低山区主要为降雨补给，中山带主要为季节性积雪融水补给，高山带主要为冰川和永久性积雪融水补给，不同补偿类型的河流表现为不同的径流特性与洪水特性。此外，南疆的叶尔羌河和库玛拉克河上游分布有冰川堰塞湖，并时常发生溃坝型洪水。

(3) 河流水循环平衡特征。对干旱区流域而言，“山区—人工绿洲—荒漠绿洲”是一个完整自然的水循环过程，山区是径流形成区，平原是径流耗散区，荒漠与沙漠地带则是河流的散失区，绿洲水循环强烈的人为作用与荒漠水循环自然衰竭变化是一个自上而下响应敏感的单向过程。上中游过度增加用水，必然会造成下游水量减少，荒漠生态环境恶化。

(4) 流域“四水”转化循环特征。流域地表水、地下水同出一源，主要来自山区降水。河流出山口后，地表水与地下水转换频繁，平原区 86% 以上的地下水来自地表水转化补给。地表水、土壤水、地下水在频繁转化的过程中，以“液态”转化为“气态”的形式全部消耗于大气中。“四水”转化与消耗其形式、地点、时间不同，产生的效益也截然不同。

(5) 绿洲水盐平衡变化特征。干旱区水盐遵守“盐随水来、盐随水去”客观规律，维持农田土壤脱盐或不积盐、流域内有害物质(如盐份)的合理排放，是绿洲水循环调控的关键。随着人类活动的加剧，地表水被大量引入绿洲，而绿洲中大量的有害物质都因没有足够的水而被带出，使得绿洲内有害物质入多出少，且河流下游湖泊不断萎缩干涸，致使绿洲内部和外部的环境质量出现劣变态势。

(6) 人类活动影响下的区域水循环特征。“绿洲经济、灌溉农业”是区域经济的显著特征，脆弱的生态系统对水土资源开发响应十分强烈，经济系统

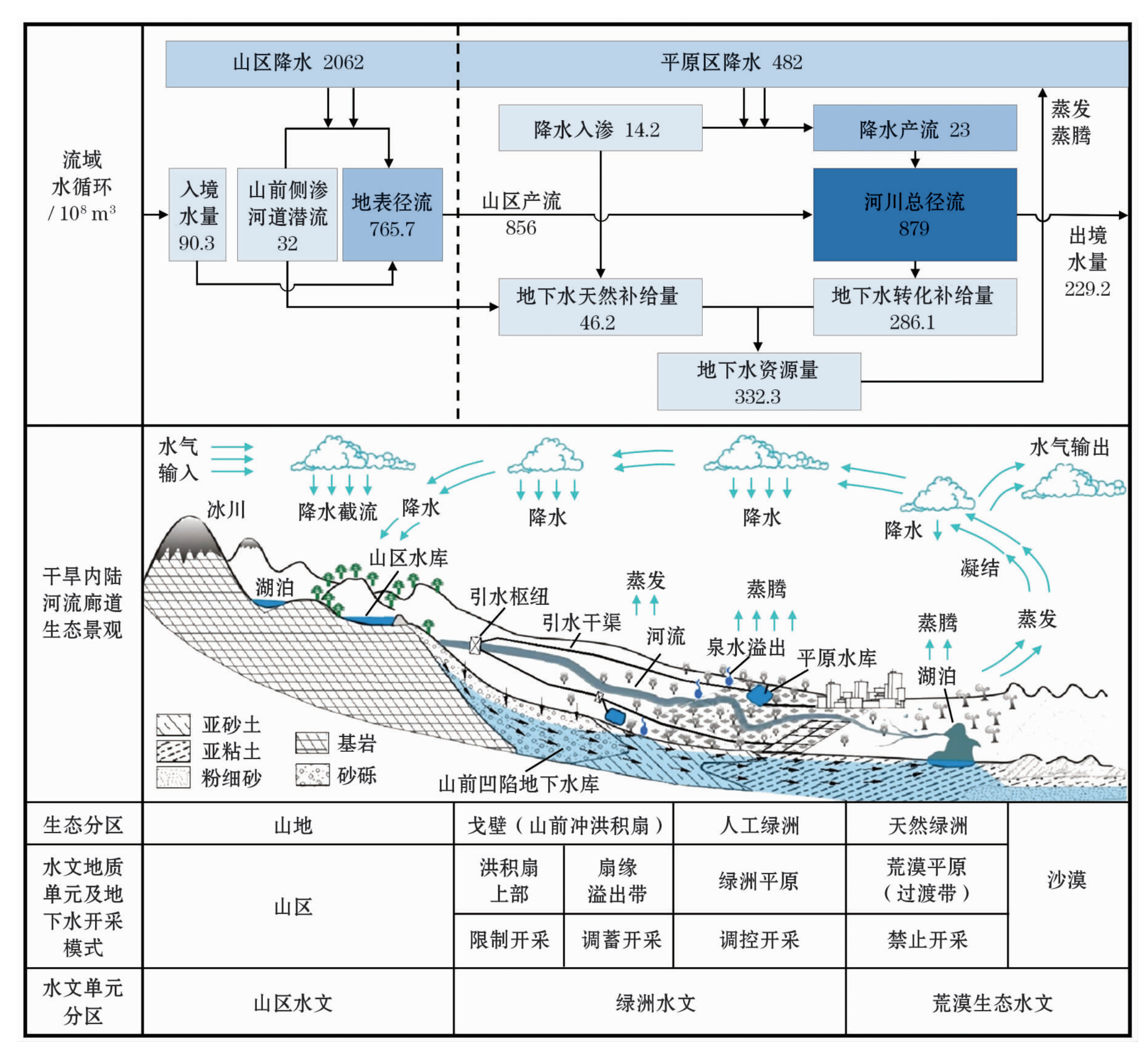


图 1　新疆水资源及内陆河流域水循环示意图

Fig. 1　Water cycle sketch of water resources and inland river basin in Xinjiang

表 1　新疆水资源分区统计表[10]

Tab. 1　Zone statistics of water resources in Xinjiang

地区	水资源总量 / 10^8 m^3	地表水资源量 / 10^8 m^3	地下水资源 / 10^8 m^3	地下水不重复量 / 10^8 m^3	国外入境水量 / 10^8 m^3	河川总径流量 / 10^8 m^3
新疆	834.9	788.7	332.3	46.2	90.3	879.0
北疆	401.2	380.8	100.1	20.4	27.7	408.5
南疆	412.9	391.4	219.1	21.5	62.6	454.0
东疆	20.8	16.5	13.1	4.3	0.0	16.5

与生态系统用水竞争矛盾十分突出。水土资源高强度开发所引起的水文过程和生态环境变化，已严重制约经济社会的可持续发展，寻求水资源合理利用与生态环境和谐共生的调控对策，始终是干旱区内陆河流域所关注的核心问题。

（7）干旱区水循环下的生态环境演替特征。天然植被具有明显的分带性，湿润地区依靠降雨，而干旱地区则依靠地下水。一般在河流两岸，依靠季节性地表水（或洪水）发育有胡杨、柽柳、梭梭等天然植被，形成河流廊道式生态景观特征，远离河道的天然植被则主要依靠地下水维持生存，人工绿洲内的天然植被耗水也主要是依靠转化形成的地下水。因此，地下水是荒漠生态环境保护的最后一道防线。

1.2.2 水资源开发利用及水循环调控面临的问题

新疆有约 800 个相对独立的绿洲，国土面积虽大，但 90% 以上的区域为渺无人烟的瀚海荒漠和高山，现有 14.3×10^4 km^2 绿洲面积中天然绿洲 8.1×10^4 km^2、人工绿洲 6.2×10^4 km^2[10]。绿洲人口稠密，占土地面积不到 6% 的人工绿洲却聚集着 95% 的人口，人工绿洲人口密度为 240 人 · km^{-2}，绿洲也聚集了 80% 以上的社会财富。2016 年，全疆总人口2 398 $\times10^4$，城镇化率 48.4%；国内生产总值达 9 650 $\times10^8$ 元，人均 GDP 约 4×10^4 元，农业总灌溉面积为 9 614 $\times10^4$ 亩，人均灌溉面积 3.75 亩 · 人$^{-1}$，人均粮食产量 631 kg，棉花产量 420×10^4 t 占全国的 79%（表 2）。2016 年用水总量为 565.3×10^8 m^3，其中农业用水量 533.3×10^8 m^3，占用水总量的94.3%，工业、生活、生态用水分别占总用水量的 2.1%、2.5% 和 1.1%。从供水结构看，地表水源供水量 445.9×10^8 m^3，占供水总量的 78.9%；地下水源供水量 118.5×10^8 m^3，占比 21.0%；其它水源供水量 0.9×10^8 m^3（表 3）。

长期以来，在自然环境和人类活动的双重影响下，新疆水资源利用和水循环调控面临以下三大问题：

（1）水资源时空分布严重失衡，跨界河流水安全问题突出。新疆水资源空间分布相差悬殊，以天山为界，南北疆面积分别占 73% 和 27%，但两区域内的地表水资源量基本相当，单位面积径流深北疆是南疆的 2.6 倍；以奇台—策勒县划一直线（简称奇策线），西北与东南部面积基本相当，而西北部水资源占 93%，东南部仅占 7%。境内主要河流夏季（6 ~ 8 月）径流占年水量的 34% ~ 81%，连续最大四个月水量占 43% ~ 90%，中小河流夏季来水更为集中，呈现出春旱、夏洪、秋缺、冬枯的显著特点。此外，新疆与 8 个国家接壤，有 33 条跨界河流，出境水量占自产水资源量的 29%；入境水量仅占 11%；跨界河流水资源开发利用程度低，目前额尔齐斯河、伊犁河有约 3/4 的水量流出境外的哈萨克斯坦，而从吉尔吉斯斯坦入境的水量占阿克苏河总水量的 64%，跨界河流的开发利用涉及国家水安全、生态安全等重大问题，因此在睦邻友好、兼顾全流域利益的前提下，合理开发利用跨界河流水资源已是新疆水循环调控的当务之急。

（2）水资源过度开发利用，人工绿洲与天然绿洲结构严重失调。新疆水资源开发利用率高达 70% 以上（供水量与水资源总量的比值，计出境水量），其中北疆为 51%、南疆为 82%、东疆为 117%，远高于 22% 的全国平均水平，除伊犁河和额尔齐斯河外，水资源已然呈现无源可开的局面，近 10 a 来，用水总量远远超过了 526×10^8 m^3 的“红线”指

表 2　2016 年新疆经济社会发展主要指标统计表[11]

Tab. 2　Main indicators statistical of economic and social development in Xinjiang in 2016

分区	人口		GDP / 10^8 元	人均 GDP / 元	工业增加值 / 10^8 元	农业发展指标				
	总人口 / 10^4 人	城镇化率 / %				农作物播种面积 / 10^4 亩	粮食播种面积 / 10^4 亩	棉花播种面积 / 10^4 亩	粮食总产量 / 10^4 t	棉花总产量 / 10^4 t
全疆	2 398.1	48.4	9 650.0	40 240	3 646.9	9 674	3 793.5	3 372.5	1 512.2	420.0
北疆	1 071.6	58.6	6 270.6	58 516	2 383.4	4 596	2 002.7	1 190.3	866.4	157.0
南疆	1 199.8	32.2	2 761.5	23 017	956.1	4 850	1 739.7	2 105.6	627.8	253.6
东疆	126.7	51.2	617.9	48 754	307.4	228	51.1	76.6	18.0	9.4

注：播种面积含复播，南疆复播指数为 1.2

表 3　2016 年新疆供用水量统计表 / 10^8 m^3

Tab. 3　Statistics of water resources utilization of in Xinjiang in 2016 / 10^8 m^3

分区	合计 / 10^8 m^3	用水量 / 10^8 m^3				供水量 / 10^8 m^3		
		生活	工业	农业	生态	地表水	地下水	其他水源
全疆总计	565.4	13.9	11.7	533.3	6.5	445.9	118.6	0.9
北疆地区	202.9	7.9	6.8	184.2	4.1	145.2	56.9	0.7
东疆地区	24.0	0.8	1.2	21.6	0.4	10.6	13.3	0.1
南疆地区	338.5	5.2	3.7	327.5	2.0	290.1	48.3	0.1

注：（1）数据来源于新疆 2016 年水资源公报。（2）表中所列生态用水系指水利工程直接提供的用水

标[12]。干旱内陆河水土资源开发利用过程实际上就是人工绿洲与天然绿洲的动态平衡过程，大量的水被截流在人工绿洲，一方面造成“河湖结构”组成的天然水系急剧萎缩，另一方面又造成“渠库结构”组成的人工水系不断膨胀，天然绿洲生态用水被大量挤占，导致河流断流、湖泊干涸、地下水位下降、湿地萎缩退化、生态系统受损、荒漠植被衰竭，加之水利工程建设等因素的影响，土地沙化日益加剧，河流物质输运能力下降，水体自净能力减弱，水环境容量降低，生境破碎化严重，水生态系统恢复力和抵抗力减弱，水生态系统生物多样性降低，进而危及人工绿洲安全稳定，最终影响经济社会可持续发展。

（3）水资源利用效率效益低，供需矛盾和水盐平衡难以得到有效调控。受用水结构不合理，农业用水占比高达94%以上（全国为62%，同为干旱区的以色列保持在56%左右），居干旱区之首。用水效率效益低，人均用水量是全国的5.5倍，万元GDP用水量是全国的5.6倍。粮食水分生产效率低，单方水粮食产出为0.9 kg，美国和以色列达到2 kg以上，农田综合灌溉定额为全国平均值的2倍，农田干、支、斗三级渠道 18×10^4 km，防渗率为56.1%，灌溉水利用系数为0.53，节水潜力较大。盐渍化耕地占耕地面积的37.7%，由于高效节水灌溉大面积的推广，传统大灌大排的水盐调控模式，已呈现无水可洗、难以维继的局面，新的“水盐平衡”调控模式目前还处于在理论研究和实践探索阶段。在用水总量不超“红线”的前提下，逐步转移农业用水，并用于发展工业和服务业等高效益产业，是未来始终坚持的方向。需要注意的是，今后长期一段时间内，乡村振兴战略、美丽乡村建设、生态移民、扶贫搬迁、兵团南进等社会工程，都还需要大量的水土资源增量作支撑。除去跨界河流出境水量后，要将河道外引水率由现状的82% ~92%降低至70%以下，将会触及诸多方面利益和社会矛盾。

2 干旱区三层级多目标水循环调控理论

2.1 调控理论

2.1.1 调控目标

针对干旱区水循环特征及水资源的多维属性，以水问题为导向，基于水文水资源学、恢复生态学和系统工程学等基本理论，从跨流域调水与区域平衡发展、流域上中下游统筹与绿洲结构优化、水资源高效利用与绿洲生态环境保护等三个调控视角，遵循“节水优先，空间均衡，系统治理，两手发力”治水思想，建立水循环调控模型，探索符合新疆实际的治水模式，努力实现三大调控目标。即：提高区域水资源与生态环境承载力、在维护人工绿洲与天然绿洲合理结构条件下降低缺水量、提升经济社会用水效率与效益，最终实现经济与生态协调可持续发展（图2）。

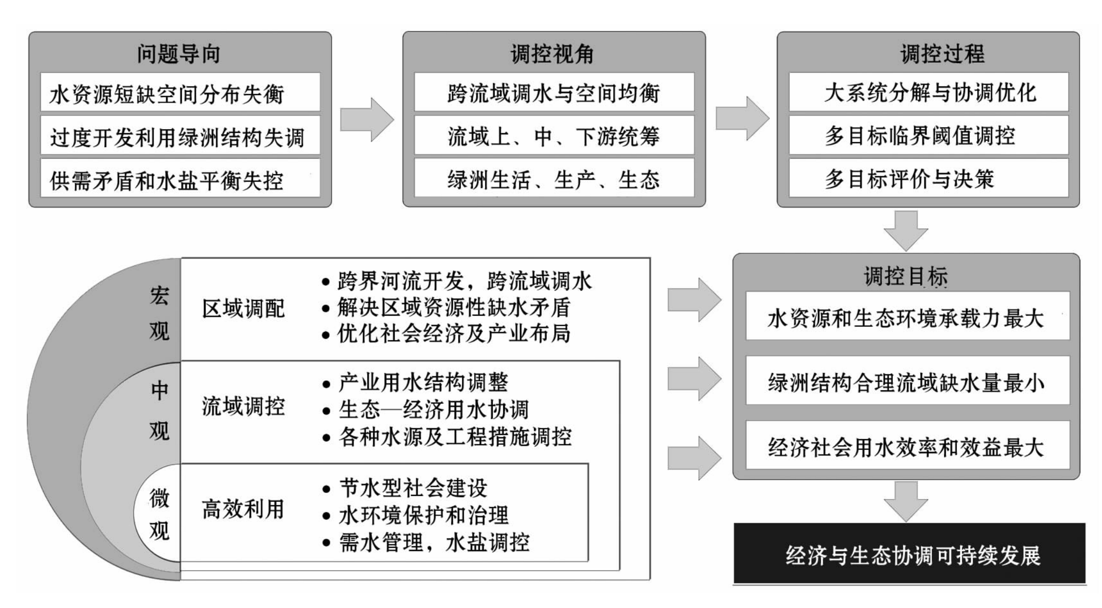


图2 干旱区水循环调控理论与技术路线图

Fig. 2 Route map of theory and technology of water cycle regulation for arid area

2.1.2 调控的内涵、原则与模式

(1) 水循环调控内涵。在保障生态环境基本用水需求的前提下,以农业高效节水为重点,调整用水结构,优化水资源配置,通过建设重大水资源调配控制性工程,构建水循环调控、水资源合理配置与高效利用的工程技术体系。应用行政与市场手段,强化需水管理和科学管理,“以水定地”,遵循水的循环规律,确定土地利用和生态保护格局;“以水定产”,根据水资源可利用量,确定土地开发规模和产业结构;“以水定城”,按照水资源承载能力确定城镇规模,按照水系统的空间结构确定城市布局,按照水循环特征确定城市建设模式。根据资源共享、高效经济、统筹协调和持续利用的原则,采取工程措施与非工程措施相结合的方法,防洪与抗旱、水量与水质、开源与节流、发电与灌溉统筹兼顾,实现水资源优化调度、合理调配、高效利用。

(2) 水循环调控原则。在宏观层级,新疆东南部水资源的极度匮乏与其西北部大量流出境外的事实形成明显反差,因此加快跨界河流开发、实施跨流域调水、提高水资源和环境承载能力,是区域水循环调控的关键举措,也是解决经济社会发展布局与水资源分布不协调矛盾的有效途径;在中观层级,对大部分干旱区而言,单位面积耗水量人工绿洲是天然绿洲的3倍,即:每开发1亩人工绿洲,将挤占3亩天然绿洲的生态用水[13-16]。因此,保障生态用水、平衡绿洲结构,是流域水循环调控的关键环节,也是解决流域上、中、下游水资源合理调配和人工绿洲与荒漠绿洲协调发展问题的有效措施;在微观层级,新疆农业用水不仅长期占经济社会用水的94%以上,且利用效率低下、灌排失调,造成1/3耕地盐碱化。因此,建设节水型社会尤其是大力发展高效节水农业,调控地下水位,平衡灌区水盐,优化用水结构,加强需水管理,是人工绿洲水循环调控的关键措施,也是解决用水效率和效益问题的有效手段。

(3) 水循环调控模式。在干旱区内陆河流域,绿洲化和荒漠化是两大并存的环境变化趋势。其关键是合理协调、科学把控人工绿洲与天然绿洲两大竞争性用水户的矛盾。长期以来,内陆河流域水循环调控方式以单一的经济增长型为主,在这种开发利用模式主导下,水资源过度开发利用所引发的生态环境问题已越来越严重。人们已清醒地看到所面临的威胁,并从思想上广泛认同了综合协调发展的水循环调控模式,即:在山区水资源形成区,秉持“绿水青山就是金山银山”的发展理念,实施减牧育草,涵养水源,保护水功能;在人工绿洲水资源利用耗散区,推进现代灌区建设,节水节能,有效调控灌区水盐平衡,内涵挖潜,绿水、高效、自律发展;在荒漠绿洲水资源散失区,确保生态水权,禁止开采地下水,构建河、湖、林、田、草等生态单元互动连通的“大生态”体系,根本扭转“山区草原生态退化—绿洲次生盐碱化—河流下游荒漠化”的不良局面。

2.2 调控模型

基于新疆水资源合理配置层级分析以及多目标水循环调控理论,应用大系统分解方法[17],建立西北干旱区“三层级”多目标水循环调控模型。

2.2.1 宏观—区域水循环调控模型

宏观层级,以区域经济社会发展和生态环境保护对水资源的合理需求为目标,以水资源、水环境的承载能力为约束条件,科学规划区域水资源总体开发利用方案并实现其合理配置。模型如下:

目标函数:区域水资源和环境承载力 POP 最大

$$MaxPOP = \sum_{i=1}^{n} (W_{可利用\,i} - W_{生态\,i}) \Big/ (W_{生活\,i} + W_{生产\,i}) \quad (1)$$

约束条件:

(1) 当地水资源与跨流域调水的水量平衡方程:

$$W_{可利用\,i} = W_{当地\,i} + W_{调水\,i} \qquad i = 1,2,3\cdots,n \quad (2)$$

(2) 调控阈值:

$$W_{生活\,i} \leqslant W_{阈值1,i} \qquad i = 1,2,3\cdots,n \quad (3)$$

$$W_{生态\,i} \leqslant W_{阈值2,i} \qquad i = 1,2,3\cdots,n \quad (4)$$

$$W_{生产\,i} \leqslant W_{阈值3,i} \qquad i = 1,2,3\cdots,n \quad (5)$$

式中:$W_{可利用}$为流域可利用水量;$W_{生态}$、$W_{生活}$、$W_{生产}$分别为生态、生活和生产(工业和农业灌溉)供水量;$W_{调水}$为跨流域调水量;$W_{阈值1}$、$W_{阈值2}$、$W_{阈值3}$分别为生活、生态和生产用水调控阈值,根据区域的人口规模、生态保护目标、产业结构协调各方利益合理确定;i,n 分别为区域编号和区域总数。

2.2.2 中观—流域水循环调控模型

中观层级,包含流域单元内的地方和兵团所属的各行政区域,均应以“三生用水”合理配置为出发点,在协调兼顾地方与兵团,绿洲结构与产业结构,经济发展与生态保护等各方利益的前提下,实现流域内水资源合理配置、高效利用。模型如下:

目标函数:流域缺水量最小

$$\mathrm{Min}\Delta W=(W_{生活}-W_{X生活})+(W_{生产}-W_{X生产})+(W_{生态}-W_{X生态}) \quad (6)$$

约束条件:

(1) 流域水量平衡:

$$W_{流域}=W_{河内}+W_{河外}=W'_{社经}+W'_{生态}=W'_{人工}+W'_{天然} \quad (7)$$

(2) 调控阈值:阈值约束人工绿洲自律发展[6]

河道内与河道外引水比控制

$$W_{河内}:W_{河外}=3:7 \quad (8)$$

社会经济与生态耗水比控制

$$W'_{社经}:W'_{生态}=5:5 \quad (9)$$

流域生态耗水总量

$$W'_{生态}=W_{河内}+W_{绿洲内}\geq W_{流域}\cdot 50\% \quad (10)$$

式中:$W_{生产}$为生产供水量;W_X 为需水量;$W_{流域}$为内陆河流域河川径流总量;$W_{河内}$、$W_{河外}$分别为河道内、外引水控制水量;$W'_{社经}$、$W'_{生态}$为社会经济、生态环境消耗水量;$W'_{人工}$、$W'_{天然}$为人工绿洲和天然绿洲消耗水量;$W_{绿洲内}$为人工绿洲内生态用水量。

2.2.3 微观—高效利用水循环调控模型

微观层级是指人工绿洲内各分区、各产业水资源高效利用水循环调控。模型如下:

目标函数:水资源高效利用

$$(1)\quad \mathrm{Max}\eta=\sum_{j=1}^{m}\eta_i \quad (11)$$

$$(2)\quad \mathrm{Max}B=\sum_{j=1}^{m}B_i \quad (12)$$

约束条件:

(1) 分区调控平衡方程:

分区水量平衡

$$W_{人工}=W_{生活}+W_{工业}+W_{农业}+W_{牧业}+W_{绿洲} \quad (13)$$

分区水土平衡 $F_{灌面}\leq F_{灌控}$ (14)

分区水盐平衡 $S_{盐}\leq 0.2\%\sim 0.5\%$[18] (15)

(2) 调控阈值:水资源管控三条“红线”约束[12]

水资源总量控制红线

$$W_{人工}=W_{地表}+W_{地下}\leq W_{总控} \quad (16)$$

水资源利用效率控制红线

$$Q_{工}\leq Q_{工控} \quad (17)$$

$$\eta_{农}\geq 0.55\sim 0.63 \quad (18)$$

水功能区限制纳污红线

$$C<A \quad (19)$$

$$R_{水质}\geq 95\% \quad (20)$$

式中:η 为水资源利用效率;B 为水资源利用效益;$W_{人工}$为人工绿洲供水量;$W_{生活}$、$W_{工业}$、$W_{农业}$、$W_{牧业}$、$W_{绿洲}$分别为生活、工业、农业、牧业和绿洲内生态供水量;$\eta_{农}$ 为灌溉水利用综合系数;$Q_{工}$ 为工业万元产值供水量;$W_{地表}$、$W_{地下}$分别为地表、地下水量;$W_{总控}$为水资源利用控制总量;$Q_{工控}$为工业万元增加值取水量;$F_{灌控}$为灌溉控制面积;$F_{灌面}$为灌溉面积;$S_{盐}$ 为无机盐浓度;C 为入河污染物总量;A 为河流纳污能力;$R_{水质}$为水功能区水质达标率;j 、m 分别为人工绿洲分区编号及分区总数。

3 三层级多目标水循环调控关键技术与保障措施

3.1 调控方法与关键技术

3.1.1 宏观—区域水资源调控关键技术

宏观层级水循环调控方法。在对区域水资源进行科学评价的基础上,根据社会经济发展总体布局,合理协调供需平衡关系,制定水资源长期需求计划,通过跨流域调水,合理调配区域水资源分布,解决社会经济发展布局与水资源分布不协调、不平衡的矛盾。

新疆地域辽阔,南疆、北疆、东疆各区域间自然环境、水资源禀赋与经济发展水平差异较大,资源性缺水的重点区域为天山北坡、东疆吐哈盆地和南疆塔里木盆地,而水资源可开发的潜力主要集中在伊犁河和额尔齐斯河流域。从长远看,根本解决新疆东南部乃至中国西北地区资源性缺水问题,还寄希望于国家实施南水北调西线调水工程。基于“三山夹两盆”地貌及水资源分布特征,应建立北疆“网式”、南疆“环式”、东疆“串式”结构的水资源配置总体框架系统。通过跨流域调水与当地河流水系组合,在天山北坡构建东西贯通的“水网廊道”,在南

疆构筑环塔里木盆地"生命水链"，利用调水工程将东疆串联起来，为极度缺水的吐哈盆地提供"基本用水保证"（图3）。

3.1.2 中观—流域水循环调控关键技术

中观层级水循环调控方法。以流域规划为依据，通过优化工程措施，有效利用工程、经济、法规等综合管理手段，解决上、中、下游水资源合理调控和人工绿洲与荒漠绿洲协调发展问题，逐步实现流域水资源利用结构优化、缺水量最小的调控目标。

（1）流域水循环功能定位及关键调控阈值。基于"山区—绿洲—荒漠"水循环特征、"汇流形成—开发利用—生态保护"的水功能定位、以及水资源"供、用、耗、排"平衡分析，确立河道内与河道外引水"三七调控"、经济与生态耗水"五五分账"的临界调控阈值[6]，建立以山区水文、绿洲水文、荒漠生态水文为构架的内陆河流域水文水资源学，扭转"山区草原生态退化—绿洲次生盐碱化—河流下游荒漠化"的被动局面，确保水资源—生态环境—社会经济复合系统结构合理，运转良好。

（2）构建和谐流域三大关键要素。一是人与自然和谐，构建生态健康河流，重点强调以水资源及生态环境承载能力为前提的协调发展，维持河流自然特征，保护生物多样性，满足水功能区划要求；二是流域功能和谐，构建水资源综合利用体系，重点强调以"三生"用水合理配置为核心，统筹协调供水、灌溉、生态、防洪、发电等水资源综合效益的发挥；三是流域主体利益和谐，构建利益共同体，重点处理好上游与下游、发展与保护、灌溉与发电、地方与兵团之间的利益关系。

（3）地表水与地下水联合调度关键技术。新疆具有独特的地下储水构造和丰富的地下水储量，既有积极参与流域水循环的地下水资源可供长期平衡

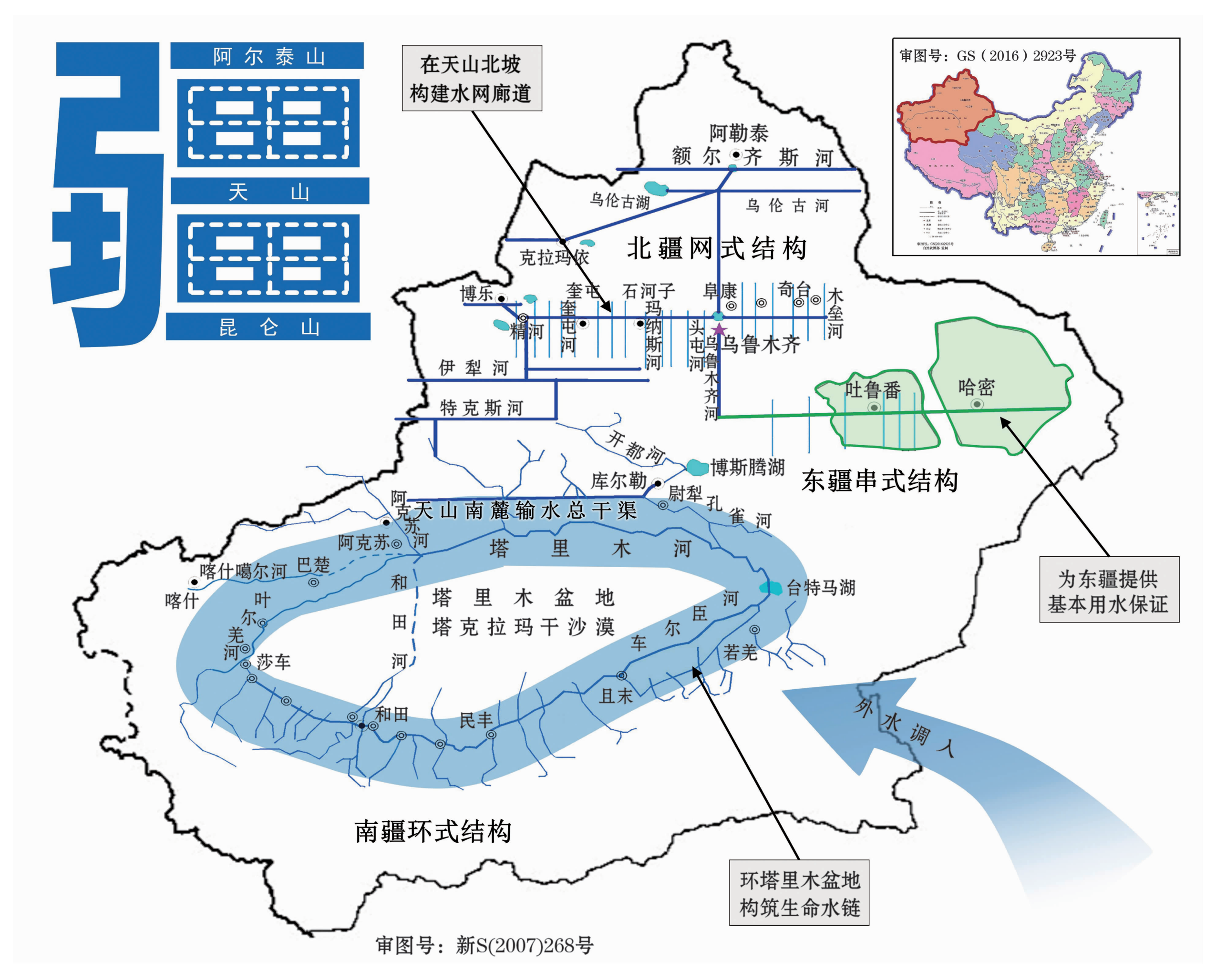


图3 新疆区域水循环调控布局示意图

Fig. 3 Sketch of water cycle regulation distribution in Xinjiang

开采,又有巨大的储存量可供多年调节。围绕地下水库的规划与设计理论、人工回补、地下水与地表水联合调度等关键技术,系统研究地下水库的成库条件、工程结构型式以及相关可行性问题,充分发挥地下水储水构造及储存水的自然优势,拓展地下水与地表水联合调度的时间和空间尺度,更好地发挥干旱区水资源的综合效益[19]。

(4)流域水循环综合调控措施。优化组合各类工程措施,以山区水库为龙头,引水渠首、防渗渠道、地下水开发、节水灌溉、水盐调控等工程手段联合运用,形成管理有序,调度有效的工程体系;优化供用水结构,合理调配各种水源(地表水、地下水、外流域调水、中水),合理配置"三生"用水(生活、生产、生态);强化需水管理,全面建设节水型社会,调整生产力布局和产业结构,运用法规、经济等综合手段,使供需关系逐步协调,相互匹配(图4)。

3.1.3 微观—水资源高效利用关键技术

微观层级水循环调控方法。包括防洪、抗旱、供水、发电、节约用水、地下水开发利用、生态保护、环境治理、水盐调控,以及单项工程运行管理和水资源综合管理等。通过结构调整、节水型社会建设、需水管理等综合措施,解决用水效率和效益问题。宏观和中观层级指导微观层级,并将其运行管理的情况依次反馈给中观和宏观层级进行逐级协调,以寻求最佳的水资源合理配置方案。主要关键技术有:

(1)地下水分区开发与灌排分区调控技术。内陆河流进入平原区后,普遍形成4个显著的水文地质单元,即:冲洪积扇、扇缘溢出带、绿洲平原、荒漠平原(图1)。针对这4个单元内的水文地质特点,建立以水量调蓄、水位调控为主的地下水分区开发模式,即:限制开采区、调蓄开采区、调控开采区、禁止开采区。并基于水盐平衡调控,建立分区灌排模式,即:垂直入渗排水、井灌井排、井灌井排与水平排水结合、水平排水与干排盐结合,明排与暗排结合。但大面积膜下滴灌彻底改变了农田水盐运移特征,滴灌导致根区驱盐、非根区积盐,需要创新水盐调控理论与技术。

(2)"四位一体"水资源高效利用综合技术。"节水灌溉—水盐调控—地下水利用—生态保护"是内在关联的有机整体(图5)。在大力提升农业节水技术水平和规模化、产业化能力的同时,须研究不同土壤类型、不同灌溉方式水盐运移规律,建立科学的水盐调控技术体系;地下水的排泄方式和水位调

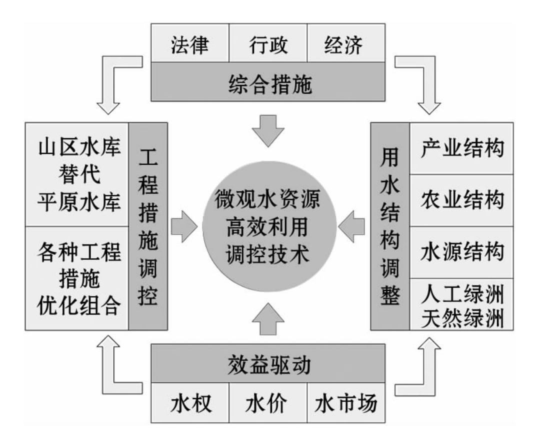


图4 流域水循环调控技术路线图

Fig. 4 Route map of water cycle regulation

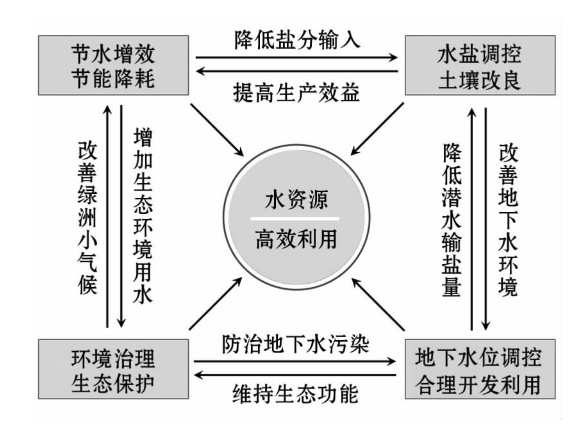


图5 "四位一体"水资源高效利用关系图

Fig. 5 Four-in-one relation graph of high efficient utilization of water resources

控,是土壤水盐调控的关键,须分区建立地下水开发和水盐平衡灌排模式,合理调控管理地下水位,延缓土壤积盐过程;农田防护林和周边的荒漠植被是保护绿洲及防治沙漠化的屏障,其生存主要依靠地下水,农田高效节水或地下水过度开发,都将影响到绿洲生态安全。我们应当认识到,过去在强调农田高效节水的同时,忽略了水盐平衡,忽略了全成本的边际效益评价,忽略了适宜性和适度性,忽略了绿洲内的生态环境保护。

(3)构建农作物生境要素耦合的综合调控技术体系。针对滴灌和膜下滴灌技术产业化、规模化发展的态势,以实现提升水土—水肥生产效率、作物产量—品质为目标,系统揭示水、肥、气、热、盐、生、药等七大要素与作物生长的耦合作用机制,创建集"光热技术、覆盖技术、灌溉技术、施肥技术、土壤改良技术、农药施用技术"为一体的科学的作物生境综合调控技术模式,是现代灌区发展的必然路径。

目前水肥耦合、水气耦合（如加氧灌溉、活化水灌溉）、水热耦合（加热灌溉）等新型灌水技术及其相应灌溉制度的研究，已从试验示范逐步转入实践应用。土壤田块和剖面尺度的“水盐和谐相容”调控技术，以及生物、化学改良技术等，目前还处于在理论研究和实践探索阶段。

3.2 调控措施与重点工程布局

3.2.1 区域水循环调控与跨流域调水工程布局

（1）“北疆网式”水资源配置工程架构。通过北疆供水工程和艾比湖流域生态环境保护工程，在天山北坡建设外调水量 40×10^8 m^3、东西连通的输水大通道，串通天山北坡由南向北流的诸小河流，形成一个南北交汇，东西贯通，覆盖整个经济带的水网体系。目前，北疆供水一期工程及“500”东延供水管道、西延干渠已建成，伊犁河跨天山向艾比湖调水工程以及配套的输水干渠已开工建设，天山北坡“网式”水资源配置格局已基本形成。

（2）“南疆环式”水资源配置工程架构。环塔里木盆地的 144 条大小河流呈“向心式”汇入盆地，并在盆地周边海拔 800 ~ 1 200 m 的地带构成了承载生命与绿洲的生态经济圈，为进一步巩固这一自然分布格局，一方面通过塔里木河流域综合治理，增加各源流汇入干流的水量，保护河湖水系连通，另一方面寄望于外流域调水，建设“新龟兹工程”“新楼兰工程”，构筑环塔里木盆地“生命水链”和绿洲城镇—生态经济圈，为南疆经济社会稳定发展注入新的活力[20]。

（3）“东疆串式”水资源配置工程架构。近期延伸引额供水工程，由西向东修建一条输水通道，将哈密、吐鲁番地区串联起来，为其提供基本的用水保障。远期依托大西线调水工程，由东向西将河西走廊、吐哈盆地串为一体，实现“古丝绸之路走廊”向“新欧亚大陆桥走廊”的转变，建设好这条事关国家和地区生态经济安全、具有战略意义的生态经济走廊，实现“发展边疆，稳定南疆，经略东疆—河西走廊”的宏观战略布局。

3.2.2 流域水循环调控与生态修复工程措施

（1）山区水库替代平原水库工程。20 世纪 50 ~70 年代，为满足屯垦戍边的需求，修建了 400 余座平原水库，形成了“上引下蓄，一块天对一块地”的调控格局。平原水库渗漏蒸发损失严重，水库水利用效率不足 50%，并造成周边地下水位抬升，产生大量次生盐碱化土地。进入本世纪以来，山区水库建设进入快速发展时期，共规划山区水库 105 座，其中已建和在建的就有 94 座，极大地提升了流域水循环调控和防洪抗旱能力[21]。山区水库逐步替代平原水库，将打破现有灌溉系统格局，应当对错乱低效的灌溉输水系统实施彻底改造。

（2）建设牧区水库保护草原生态。新疆从平原到山地发育荒漠、草原、草甸、沼泽等四大类草地 7×10^8 亩，由于过度放牧和人为破坏等原因，85% 的草地严重退化。实现游牧民定居，是解决“三牧”（牧民、牧草、牧业）问题的根本措施。按照“定居须先定畜，定畜要先定草，定草必先定水”的客观需求，根据“草畜平衡，水土平衡，小开发大保护”的设计思想，建设 30 余座水源工程，以及相应的输水和田间配套工程，为游牧民“定居兴牧”提供水资源保障[22]。

（3）利用天然储水构造修建地下水库。新疆高大山体中的山间断陷盆地、山间凹陷、山前凹陷等天然地质单元，都是极为良好的储水构造。构造基本处于封闭状态，砂砾石层深厚，地下水埋深浅，含水层透水性好，具有水量丰富、水质优良、回补快、适宜开采等优点。目前，已在台兰河山前凹陷带建成“横坎儿井”地下水库，在玛纳斯河利用山间向斜洼地构造建成城市水源工程，为洪水资源化和地表水与地下水联合调度开辟了一条新途径，同时也创立了一种新的水利工程型式[19,23]。

（4）生态修复工程与生态调度。围绕后坝工时代和跨流域调水后的生态环境问题，开展流域综合治理，针对塔里木河下游断流近 30 a 的 357 km 河道，连续 18 a 实施生态输水[24]，今后应进一步巩固塔里木河综合治理和生态修复成果。在额尔齐斯河开展“水库联调、三次脉冲、漓漫灌溉”多尺度耦合的生态调度创新实践，在减水河段修建生态闸、阻水堤、溢流口、疏通河汊，形成水网通达、水势漫溢的漓漫生态灌溉系统，实施“七库一干”与漓漫灌溉联合调度，有效保护了 520 km 河道范围内的 230×10^4 亩林草湿地和 23 种土著鱼类[25-26]。

（5）水资源利用及综合调控措施。干旱内陆河流域对水资源综合利用要求高，涉及供水、灌溉、防洪、发电、生态等方方面面，在水资源综合利用诸多利益矛盾中，应坚持"电调服从水调"的原则，合理确定生态环境保护目标及需水量，维护河流“生命健康”，科学制定河道生态基流和生态用水过程线的水库调度方案，重点协调好发电与灌溉、调节与反

调节的矛盾,建立大坝建设与效益分摊、生态补偿机制。以供定需,强化需水管理。

3.2.3 绿洲水资源高效利用与生态环境保护措施

（1）高效节水节能。新疆以膜下滴灌为代表的高效节水面积达到 5 140 × 10^4 亩,占总灌溉面积的 56.5%,远期将达到 70% 以上,是全国高效节水面积最大的省区。将先进节水灌溉技术、现代农业管理技术和互联网技术结合起来,构建智能灌溉系统,是现代绿洲灌溉农业发展的方向。过去由于片面强调农业节水,忽视了输配水系统节水改造和土壤盐碱化防治,导致运行成本加大、土壤盐分累积加重,进而影响了高效节水技术应有功效的发挥。初步统计,加压滴灌年耗电约 60 × 10^8 度,相当于消耗煤炭 200 × 10^4 t,排放 CO_2 约 510 × 10^4 t。山区性河流及水库具有高水位、自压灌溉的天然优势,放弃天然水头而重新加压灌溉,耗能巨大,这个问题值得深思。新疆具有发展自压灌溉得天独厚的优势,建设山区水库—管道输水—自压滴灌的现代灌溉系统,既可大幅提升水资源输配效率,又可降低工程运行成本。

（2）盐碱地改良。新疆农田灌溉长期处于“有灌无排”“灌排失调”的状态,各种污染物如盐分、化肥、农药、地膜残余等,不断在土壤中累积,导致土壤污染、耕地次生盐渍化。水既是盐渍化形成的动力,也是排盐治碱、土壤改良的驱动力。要将土壤中盐分“洗出”并保持脱盐状态,必须保持 25% ~50% 以上的洗盐压碱用水,洗盐用水是干旱区灌溉农业用水的重要组成部分[22]。目前从流域—灌区—农田—土壤剖面尺度,普遍处于恶性循环的积盐进程,在干旱区,供需平衡与水盐平衡,两者之间任何一方失衡都将影响农业可持续发展。目前,传统的“大灌大排”水盐调控模式已难于维继,需要建立新的水盐调控理论与技术体系,加速开发低成本、高效率的盐碱地治理新材料、新装备与改良剂产品,筛选耐盐碱高产作物品种,加快农艺及生物改良措施研发与应用。将高效节水与盐碱地改良有机融合,充分发挥水利、化学、农业、生物等技术优势,构建旱区盐碱地高效改良综合技术体系和模式,不断提升土地质量和生产能力,进而提高水分生产效率,实现农业高效节水和土地质量同步提升目标。

（3）地下水合理利用。地下水开发利用在水资源合理配置中具有补充调节、水位调控、生态保障、高效利用等 4 个显著作用。地下水与地表水联合调度,充分发挥地下水开发“枯增丰减,以补定采,多年平衡”的补充调节作用,大规模纯井灌区或深井灌区都是不可持续的。在灌区内合理开采地下水,可有效调控地下水位,减少潜水蒸发,防治土壤次生盐碱化,有利于发挥土壤水库的调节作用,根据相关研究,绿洲灌区最佳控制地下水位埋深为 3 m 左右。在干旱区内陆河流,荒漠植被主要依靠地下水生存,因此地下水是天然植被保护的最后一道防线。适宜生态水位(埋深)为 2 ~4.5 m,胁迫水位 4.5 ~6 m,沙漠化水位 >8 m[27-28]。新疆地下水资源主要来自于河道、渠道、田间渗漏等转化补给,合理开发利用地下水可进一步提高水资源的利用率。由此可见,建立科学的地下水分区开发、合理利用、有效调控模式,对于提升水资源综合利用水平,具有举足轻重的作用。

（4）污染防控与绿洲生态保护。新疆目前中水回用量仅为 0.9 × 10^8 m^3,生活污水、工业废水、农田排水、苦咸水等非常规水源的利用尚处起步阶段,特别是农村生活污水处理基本处于无序状态。对干旱内陆河流域而言,非常规水源的开发利用对缓解水资源供需矛盾、提高水资源配置效率和利用效益,意义重大。除了城市景观、绿化、冲厕、道路清洁、车辆冲洗、建筑施工等用水应优先配置再生水外,荒漠生态对再生水和微咸的水质要求偏低且需求量大,具有广阔的开发利用前景。通过发展科学简单易行的非常规水处理技术,消除有害物质对土壤和作物的威胁,与土壤改良技术有机结合,开发与常规水混灌和轮灌的高效节水技术,构建适应旱区农业水资源高效利用的技术体系和应用模式。另外,在实施高效节水灌溉和地下水开发利用的同时,还必须兼顾绿洲防护林、天然植被、湿地草甸等生态环境的保护要求。近年来,为大规模推行膜下滴灌,同时也新增了大批机电井,造成农田周边地下水位下降,农田防护林和灌区周边天然植被枯亡。

4　干旱区水循环调控理论与工程技术框架体系

以上所阐述的调控理论、调控技术、调控措施和重点工程调控布局,共同构成干旱区水循环调控理论与工程技术体系(图 6)。近 20 多年来,按照三层级、多目标、系统耦合的综合调控要求,积极探索符合域情和水情的科学治水发展之路,一批大型水资源配置工程、流域重点控制性水利枢纽、民生水利工

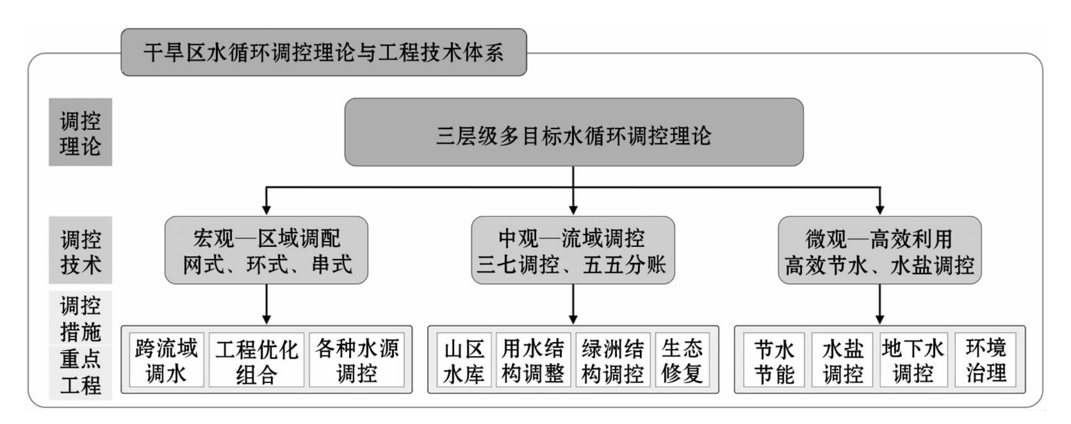


图 6　干旱区水循环调控理论与工程技术体系框图

Fig. 6　Block diagram of system of water cycle regulation theory and engineering technology in arid region

程、生态水利工程等相继建成。水资源宏观配置格局初步形成,为新型工业化、新型城镇化发展,生态环境改善,人民生活质量提高发挥了重要作用。

在宏观层级,以跨界河流开发、跨流域调水为主线,形成了“北疆网式”“南疆环式”“东疆串式”的水资源配置的空间格局;在中观层级,山区水库替代平原水库工程有序进行,产业用水结构与绿洲用水结构正朝逐步优化的方向调整,高效节水与生态修复工程建设持续深入推进,截至 2017 年底全疆高效节水灌溉面积达到 5 140 $\times 10^4$ 亩,其中 98% 为膜下滴灌,占我国微灌面积的 75%;在微观层级,作物—田间—灌区高效节水、地下水位调控分区开采、灌排平衡的水盐调控、地下水库与地表水联合调度等技术,因地制宜地得到推广应用,良好和谐的水资源利用—社会经济发展—生态环境保护关系正在逐步建立,工程与非工程措施相结合,宏观、中观、微观协调统一,为干旱区水循环调控目标的实现,提供了体制机制保障。

5　总 结

(1) 我国西北干旱区内陆河流域自然水循环呈现出水资源形成区与消耗利用区分离、水资源短缺且时空分布严重失衡、地表水与地下水转换强烈等的显著特征,因此水循环调控需针对水资源形成及分布特征、经济社会发展时空布局和生态环境保护目标,因地制宜,因势利导,从宏观—区域调配、中观—流域调控、微观—绿洲水资源高效利用等三个层级,采取系统治理,实现空间均衡。

(2) 节水灌溉和排水治碱是干旱区灌溉农业两大永恒主题,现代高效节能灌溉系统的优化设计和高效节水条件下的水盐调控,是当前急需解决的两大科学问题。构建以“作物生境要素耦合—节能高效灌排保障—绿洲生态农业调控”相协调的、以调控精细化、运行智能化、管理信息化为标志的综合技术保障体系,是干旱区现代绿洲灌溉农业的发展方向。

(3) 西北内陆干旱区水资源与生态环境问题,关系到国家“一带一路”倡议、生态文明、西北地区社会稳定与长治久安等重大战略目标的建设推进与实现。三层级多目标水循环调控理论与工程技术体系,构成了新疆水资源—水问题—水战略的主体框架。对提高西北干旱区水资源时空分布调控能力,优化配置区域水资源,促进内陆河流域水资源高效利用、经济社会持续发展和生态文明建设具有重要的理论意义和应用价值。

参考文献(References)

[1] 严登华,王浩,杨舒媛,等. 干旱区流域生态水文耦合模拟与调控的若干思考[J]. 地球科学进展,2008,23(7):773 - 778. [YAN Denghua, WANG Hao, YANG Shuyuan, et al. Some opinions on the eco-hydrological processes simulation and regulation in arid basins[J]. Advances in Earth Science,2008,23(7):773 - 778.]

[2] 游进军,王浩,牛存稳,等. 多维调控模式下的水资源高效利用概念解析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(6):1 - 6. [YOU Jinjun, WANG Hao, NIU Cunwen, et al. Conception of high-efficiency water utilization under multi-dimensional regulation[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2016,37(6):1 - 6.]

[3] 甘泓,汪林,曹寅白,等. 海河流域水循环多维整体调控模式与阈值[J]. 科学通报,2013,58(12):1085 - 1100. [GAN Hong, WANG ling, CAO Yanbai, et al. Multi-dimensional overall regula-

tory modes and threshold values for water cycle of the Haihe River Basin[J]. Chin Sci Bull,2013,58(12):1085 – 1100.]

[4] 王西琴,张远. 中国七大河流水资源开发利用率阈值[J]. 自然资源学报,2008,23(3):500 – 506. [WANG Xiqin,ZHANG Yuan. The allowable exploitation rate of rivers water resources of the seven major rivers in China[J]. Journal of Natural Resources,2008,23(3):500 – 506.]

[5] 中国工程院. 新疆可持续发展中有关水资源的战略研究[R]. 北京:中国工程院,2012. [The Chinese Academy of Engineering. Xinjiang sustainable development-water resources strategy research (comprehensive part)[R]. Beijing:The Chinese Academy of Engineering,2012.]

[6] 邓铭江,石泉. 内陆干旱区水资源管理调控模式[J]. 地球科学进展,2014,29(9):1046 – 1054. [DENG Mingjiang,SHI Quan. Management and regulation pattern of water resources in inland arid regions[J]. Advances in Earth Science,2014,29(9):1046 – 1054.]

[7] 王浩,王建华,秦大庸,等. 现代水资源评价及水资源学学科体系研究[J]. 地球科学进展,2002,17(1):12 – 17. [WANG Hao,WANG Jianhua,QIN Dayong,et al. The study on water resources assessment and subject system of water resources study on modern times[J]. Advances in Earth Science,2002,17(1):12 – 17.]

[8] 钱正英,沈国舫,潘家铮. 西部地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究(综合卷)[M]. 北京:科学出版社,2004. [QIAN Zhengying,SHEN Guofang,PANG Jiazheng. Water resources allocation for ecological environment construction in the west region and its research on sustainable development strategy[M]. Beijing:Science Press,2004.]

[9] 张强,赵映东,张存杰,等. 西北干旱区水循环与水资源问题[J]. 干旱气象,2008,26(2):1 – 8. [ZHANG Qiang,ZHAO Yingdong,ZHANG Cunjie,et al. Issues about hydrological cycle and water Resource in arid region of northwest China[J]. Arid Meteorology,2008,26(2):1 – 8.]

[10] 邓铭江,董新光,等. 新疆水资源及可持续利用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005. [DENG Mingjiang,DONG Xinguang,et al. Water resource and sustainable utilization in Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing: China Water Power Press,2005.]

[11] 新疆统计局. 新疆统计年鉴,2017[M]. 北京:中国统计出版社,2017. [Xinjiang Statistics Bureau. Xinjiang statistical yearbook,2017[M]. Beijing:China Statistics Press,2017.]

[12] 新疆维吾尔自治区人民政府. 新疆实施最严格水资源管理制度"三条红线"控制指标分解方案[R]. 乌鲁木齐:新疆维吾尔自治区人民政府,2013. [Government of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Decomposition scheme of control index three red lines:The strictest system of water resources management implemented in Xinjiang[R]. Urumqi:Government of Xinjiang Uygur Autonomous Region,2013.]

[13] 雷志栋,胡和平,杨诗秀,等. 塔里木盆地绿洲耗水分析[J]. 水利学报,2006,37(12):1470 – 1475. [LEI Zhidong,HU Heping,YANG Shixiu,et al. Analysis on water consumption in oases of the Tarim Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(12):1470 – 1475.]

[14] 周海鹰,沈明希,陈杰,等. 塔里木河流域 60 a 来天然径流变化趋势分析[J]. 干旱区地理,2018,41(2):221 – 229. [ZHOU Haiying,SHEN Mingxi,CHEN Jie,et al. Trends of natural runoffs in the Tarim River Basin during the last 60 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,41(2):221 – 229.]

[15] 王光焰,王远见,桂东伟. 塔里木河流域水资源研究进展[J]. 干旱区地理,2018,41(6):1151 – 1159. [WANG Guangyan,WANG Yuanjian,GUI Dongwei. A review on water resources research in Tarim River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,41(6):1151 – 1159.]

[16] 雷志栋,黄聿刚,杨诗秀,等. 渭干河平原绿洲耗水过程及特点[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(12):1664 – 1667. [LEI Zhidong,HUANG Yugang,YANG Shixiu,et al. Water resources consumption in Weigan River plain oasis[J]. Tsinghua University (Sci&Tech),2004,44(12):1664 – 1667.]

[17] 王煜,黄强,王义民,等. 黄河干流水量调配分解协调组合模型的构造研究[J]. 水科学进展,2004,15(3):387 – 390. [WANG Yu,HUANG Qiang,WANG Yimin,et al. Study on combined decomposition model for water dispatching of main steam of the Yellow River[J]. Advances in Water Science,2004,15(3):387 – 390.]

[18] 王全九,单鱼洋. 旱区农田土壤水盐调控[M]. 北京:科学出版社,2017. [WANG Qianjiu,SHAN Yuyang. Regulation of water and salt for farming soil in arid area[M]. Beijing:Science Press,2017.]

[19] 邓铭江. 干旱区坎儿井与山前凹陷地下水库[J]. 水科学进展,2010,21(6):748 – 756. [DENG Mingjiang. Kariz wells in arid land and mountain-front depressed ground reservoir[J]. Advances in Water Science,2010,21(6):748 – 756.]

[20] 邓铭江. 南疆未来发展的思考——塔里木河流域水问题与水战略研究[J]. 干旱区地理,2016,39(1):1 – 11. [DENG Mingjiang. Prospecting development of South Xinjiang:Water strategy and problem of Tarim River Basin. Arid Land Geography,2016,39(1):1 – 11.]

[21] 邓铭江,于海鸣,李湘权. 新疆坝工技术进展[J]. 岩土工程学报,2010,32(11):1678 – 1687. [DENG Mingjiang,YU Haiming,LI Xiangquang. Advances of dam construction techniques in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(11):1678 – 1687.]

[22] 邓铭江,李湘权,徐康宁,等"定居兴牧"水源工程及技术支撑体系[J]. 干旱区地理,2012,35(6):978 – 987. [DENG Mingjiang,LI Xiangquan,XU Kangning,et al. Water resources projects of settlement for development of animal husbandry and its technical supporting system[J]. Arid Land Geography,2012,35(6):978 – 987.]

[23] 邓铭江,李文鹏,李涛,等. 新疆地下储水构造及地下水库关键技术研究[J]. 第四纪研究,2014,34(5):918 – 932. [DENG Mingjiang,LI Wenpeng,LI Tao,et al. Investigation of key technolo-

gies for underground water storage structures and groundwater reservoirs in Xinjiang[J]. Quaternary Sciences,2014,34(5):918 – 932.]

[24] 邓铭江,周海鹰,徐海量,等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究[J]. 中国科学: 技术科学,2016,46(8):864 – 876. [DENG Mingjiang, ZHOU Haiying, XU Hailiang, et al. Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance [J]. Scientia Sinica Technologica, 2016,46(8):864 – 876.]

[25] 邓铭江,黄强,张岩,等. 额尔齐斯河水库群多尺度耦合的生态调度研究[J]. 水利学报,2017,48(12):1387 – 1398. [DENG Mingjiang, HUANG Qiang, ZHANG Yan, et al. Study on ecological scheduling of multi-scale coupling of reservoir group[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(12):1387 – 1398.]

[26] 张连鹏,邓铭江,黄强. 面向生态的额尔齐斯河水库群中长期调度[J]. 水科学进展,2018,29(3):365 – 373. [ZHANG Lianpeng, DENG Mingjiang, HUANG Qiang. Long-and mid-term ecological scheduling of reservoir groups[J]. Advances in Water Science,2018,29(3):365 – 373.]

[27] 董新光,邓铭江. 新疆地下水资源[M]. 乌鲁木齐:新疆科学出版社, 2005. [DONG Xinguang, DENG Mingjiang. Xinjiang groundwater resources[M]. Urumqi: Xinjiang Science Publishing House,2005.]

[28] 邓铭江. 新疆地下水资源开发利用现状及潜力分析[J]. 干旱区地理,2009,32(5):647 – 654. [DENG Mingjiang. Current situation and its potential analysis of exploration and utilization of groundwater resources of Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2009,32(5):647 – 654.]

System of three-scale multi-objective water cycle regulation theory and engineering technology

DENG Ming-jiang[1,2]

(1 *Xinjiang Ertix River Basin Development Engineering Construction Management Bureau*, *Urumqi* 830000, *Xinjiang*, *China*;
2 *State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China*, *Xi'an* 710048, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: Taking typical inland river basins in arid region of Xinjiang, China as a research subject, the paper shows three major existing problems of development and utilization of water resources, which are water resources shortage with serious space-time imbalance distribution & noticeable problem of water safety of trans-boundary rivers, overdevelopment of water resources & serious structure imbalance between artificial and natural oases & ecological environment deterioration, low efficient utilization of water resources & imbalance of water and salt & contradiction between supply and demand of water resources on systematical analysis of local geography, landform, hydro-meteorological information and characteristics for water cycle of river basins. It establishes three-scale (macro-, meso-, micro-scopic scale) multi-objective water cycle regulation theory and engineering technology system and provides scientific model and key technology of water cycle regulation for regions, basins and irrigation zones & high efficient utilization of water resources, leading by water problem and its requirement & simultaneous development of engineering measures and ecological protection and adopting systematic scientific basis theory and analysis method. Combing region landform and geographic characteristics with water resources condition, it builds up water cycle regulation structure, which is net type for north Xinjiang, ring type for south Xinjiang, and cluster type for east Xinjiang in order to strengthen regulation capacity of reasonable allocation of regional water resources. Aiming at characteristics of water cycle of basin, it proposes comprehensive regulation model of plain reservoirs replaced by reservoirs in mountainous area, Three-seven Regulation between inland and outland waterway, Five-five Control for ecological and economical water uses. Surrounding current construction of irrigation zones and its challenge, it sets up Four-in-one (water-saving irrigation & regulation of water and salt & groundwater use & ecological protection) comprehensive regulation technology system for high efficient water resources use, which is the development direction of sustainable oasis agriculture in arid region.

Key words: arid region; water resources; regulation theory; key technology; engineering measures